

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИАНОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА РАННЕЙ СТАДИИ НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ

Е. В. Паркевич^{a,b*}, *А. И. Хирьянова*^b, *А. В. Агафонов*^a, *С. И. Ткаченко*^{b,c},
А. Р. Мингалеев^a, *Т. А. Шелковенко*^a, *А. В. Огинов*^a, *С. А. Пикуз*^a

^a *Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Москва, Россия*

^b *Московский физико-технический институт
141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия*

^c *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 4 сентября 2017 г.

Лазерными методами (интерферометрический, теневой и шпирен) исследована ранняя стадия наносекундного разряда в промежутках с высокой напряженностью электрического поля на катоде. Исследования проводились в воздухе при атмосферном давлении. Основное внимание уделено изучению эволюции (появлению и росту) различных плазменных образований на аноде, а также оценке их параметров.

DOI: 10.7868/S0044451018030161

наличия диэлектрических включений или пленок на поверхности [4, 5].

1. ВВЕДЕНИЕ

Многообразие процессов, протекающих на различных стадиях импульсного разряда в газе, не позволяет на данный момент создать целостную картину, которая описывала бы как начальную, так и последующие стадии разряда. В первую очередь это относится к предпробойной стадии разряда (до начала резкого роста тока через разрядный промежуток), когда изменение параметров плазмы в промежутке происходит очень быстро (от сотен пикосекунд до единиц наносекунд) и в очень малых пространственных масштабах (от микрона до десятков микрон) [1–3].

Процессы, происходящие в момент разряда в воздухе на поверхности острия катода и вблизи его поверхности, в результате которых формируется плотная (выше 10^{17} см⁻³) плазма, исследованы в большей степени, чем на аноде. К ним относятся, в первую очередь, как взрывы микроострий, так и шунтирующие пробои по поверхности катода из-за

Для регистрации столь быстро протекающих мелкомасштабных процессов необходимо использовать диагностики, обладающие высоким пространственным и временным разрешениями. Необходимое пространственное и временное разрешения можно обеспечить методами лазерного зондирования [6]. В работе [7] с помощью лазерных интерферометрического, теневого и шпирен-методов было исследовано формирование прикатодной плазмы и показано, что на предпробойной стадии разряда вблизи острия катода образуется вытянутый в сторону анода плотный сгусток плазмы с поперечным размером несколько десятков микрон и электронной плотностью выше 10^{19} см⁻³. Были также зарегистрированы плазменные сгустки на аноде, где напряженность электрического поля на 2–3 порядка ниже, чем на катоде, однако детали возникновения и эволюции сгустков, как и другие их параметры, не обсуждались. В данной работе основное внимание уделено изучению особенностей формирования и роста плазменных образований (плазменных сгустков, каналов, нитей и т. д.) на аноде и оценке их параметров.

* E-mail: parkevich@phystech.edu

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД, ДИАГНОСТИКИ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Исследования проводились на установке, подробное описание которой приведено в работе [8]. Высоковольтный генератор установки позволяет получать импульсы напряжения со следующими параметрами: амплитуда — до 10 кВ, длительность — до 150 нс, длительность фронта импульса в режиме несогласованной нагрузки — 20 нс, максимальный ток генератора — $I_{max} \sim 1$ кА. Высокая напряженность поля на катоде достигалась установкой на электроде одиночных металлических острий диаметром от 10 мкм и более, изготавливаемых из медных или молибденовых проволочек, обладающих существенно различными тепло- и электрофизическими свойствами. Плоский анод диаметром 8 мм был сделан из латуни. Длина проволочек изменялась от 500 мкм до 1 см, величина зазора между концом проволочки и анодом — от нуля до 1 см (величина зазора в каждом конкретном выстреле определялась по теневым изображениям, полученным до подачи импульса напряжения). Максимальное расстояние между основными электродами составляло 2 см. Для лучшего электрического контакта проволочки припаивались к торцу латунного штока, который являлся катодом разрядного промежутка.

Сигналы с датчиков тока и напряжения с временным разрешением около 1 нс регистрировались цифровыми осциллографами Tektronix TDS 3054B с полосой пропускания 500 МГц. Погрешность измерения амплитуды сигналов была не больше 10 %.

Для изучения параметров плазменных образований использовалась трехкадровая система регистрации с каналами, разнесенными по времени: время задержки между I-ым и II-ым каналами составляло 2 нс, между I-ым и III-им — 13 нс. В каждом канале за один выстрел одновременно регистрировались интерференционное, теневое и шпирен-изображения. Время экспозиции каждого кадра соответствует длительности зондирующего импульса лазера. В работе использовался Nd:YAG-лазер Lotis LS-2151 с двумя гармониками, с энергией в импульсе до 40 мДж; длительность импульса на полувывоте на длине волны 532 нм составляла 70 пс. Для поджига разрядника высоковольтного генератора использовалась часть энергии лазерного пучка обеих гармоник (примерно 96 %); часть излучения только второй гармоники (менее 4 %) использовалась для зондирования разрядного промежутка.

Зондирующий импульс лазера был синхронизован с импульсом напряжения, подаваемым на на-

грузку, с точностью примерно до 1 нс [8]. Момент прихода зондирующего пучка в разрядную камеру определялся по фронту (по уровню 0.1) сигнала фотодатчика THORLABS-DET10A/M, имеющего временное разрешение около 1 нс.

Пространственное разрешение каналов регистрации было уточнено калибровкой при помощи миры 1951 USAF и составляло $d_o \sim 10$ мкм при увеличении изображения примерно в 4 раза. Контраст изображения непостоянен в различных его областях из-за дефектов оптической системы и неоднородности интенсивности лазерного поля.

Точная настройка оптической системы проводилась на торец катодной проволочки. Это позволяло максимально эффективно использовать пространственное разрешение оптической системы при регистрации катодных плазменных образований (из-за разрушения тонких проволочек настройка проводилась в каждом выстреле). При регистрации анодных плазменных образований в силу того, что место их возникновения заранее неизвестно, невозможно настолько же точно настроиться на конкретный объект. Следовательно, при обработке изображений тех объектов, которые находятся вблизи анода, необходимо учитывать возможное влияние на них дифракционных эффектов, вызванных расфокусировкой.

Распределение электронной плотности по плазменному объекту является важным параметром, характеризующим его состояние и процессы, происходящие в разрядном промежутке. Распределение электронной плотности можно восстановить по пространственному распределению диэлектрической проницаемости, полученной при анализе фазового сдвига полос на интерферограммах. Для этого решалось уравнение Гельмгольца о распространении электромагнитной волны в среде с переменной диэлектрической проницаемостью [9]. Это уравнение неразрешимо аналитически, поэтому при анализе интерферограмм в нашей работе [10] использовался численный метод плавных возмущений [9, 11], описывающий распространение электромагнитной волны в неоднородной среде в параболическом приближении при наличии цилиндрической симметрии у неоднородности, породившей анализируемое фазовое смещение. Кроме того, был проведен анализ влияния дифракционных эффектов в случае, когда малые плазменные образования заметно отстоят от предметной плоскости, т. е. при расфокусировке, превышающей диаметр острия на порядок величины [10].

В результате моделирования получено, что для объектов диаметром около 50 мкм при расфокуси-

ровке менее 100 мкм этим методом можно восстановить распределение электронной плотности с погрешностью не более 30 % при больших градиентах плотности, которые могут иметь место, например, на границе цилиндрических образований, имеющих постоянную плотность. В случае плавных распределений плотности (например, косинусоидальных) погрешность будет значительно меньше, около 3 %. Однако в случае, когда пространственное разрешение недостаточно, из-за чего основные особенности фазового сдвига полос оказываются неразрешенными, возможно получить только оценку электронной плотности по амплитудному значению сдвига, вызванного соответствующей неоднородностью. При определении диаметра неоднородностей такого масштаба на полувысоте смещения полосы погрешность не будет превышать 20 % даже при расфокусировке около 1–2 мм. При ухудшении контраста интерференционной картины, определялись лишь поперечные размеры объекта.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

После формирования катодного сгустка плазмы, который можно зарегистрировать на интерференционном изображении, вблизи поверхности анода возникают диффузные плазменные образования, наблюдаемые только на шпирен-изображениях. Характерный масштаб диффузных образований составляет несколько десятков микрон. Эти объекты могут быть разбросаны по поверхности анода, а их количество варьировать от выстрела к выстрелу. Впоследствии из этих областей по направлению к катоду начинают прорастать от одного до нескольких плазменных образований, их средние скорости в продольном направлении могут различаться между собой в несколько раз. Диффузные образования имеют нечеткие границы, следовательно, слабые градиенты показателя преломления. На интерферограммах изображения диффузных объектов могут отсутствовать, ввиду того что на этой стадии их линейная электронная плотность меньше предельно разрешимой. Кроме того, вблизи поверхности плоского электрода интерференционное изображение объектов недостаточно контрастно из-за дифракции зондирующего луча.

Момент появления на шпирен-изображениях диффузных образований на аноде определен неточно из-за большой временной задержки между I-ым и III-им оптическими каналами (13 нс). Как правило, в случае регистрации в I-ом канале катодного плазменного образования, масштаб которого

сравним с пространственным разрешением, в III-ем канале регистрировался уже сформированный анодный сгусток. При этом во II-ом канале (его временная задержка относительно I-го составляет 2 нс) анодное образование еще не регистрировалось.

Если предпринять специальные меры, задерживающие формирование катодной плазмы, то разряд может начаться существенно позже с задержкой на десятки наносекунд, либо вообще не развивается на протяжении всего времени работы генератора (1.5–2 мкс) на несогласованную нагрузку 125 Ом. В качестве наиболее простого способа задержки использовалась «тренировка» поверхности толстой медной проволоочки (диаметром $d = 150$ мкм), которая, в отличие от тонких проволоочек, не разрушалась после многих выстрелов (за исключением частичного оплавления торца). Так, в сериях с многократной подачей импульсов напряжения на промежуток при первичном использовании острия пробой развивался за время, мало отличающееся от зарегистрированного в выстрелах с использованием тонких проволоочек. При последующих импульсах, подаваемых с интервалом менее 5 мин (в среднем) после предыдущего, пробой не возникал вообще на протяжении всего времени работы генератора в том случае, если зазор между концом проволоочки и анодом составлял 3–5 мм; или задерживался на время около 100 нс по сравнению с выстрелами, в которых использовались тонкие одноразовые острия при зазоре 0.5 мм.

Эффект тренировки острия можно объяснить тем, что в течение разряда проволоочка нагревалась и ее поверхность очищалась от имеющихся на ней загрязнений (оксидные пленки, адсорбированные газы, органические загрязнения, появляющиеся при работе с проволочкой), играющих важную роль при формировании катодных сгустков плазмы. Восстановление первоначальных пробойных характеристик происходило самопроизвольно — без дополнительного воздействия — в среднем через 10 мин после выстрела (за такое время на поверхности металлов восстанавливаются тонкие оксидные пленки; адсорбция газов на поверхности металла происходит гораздо быстрее).

Влияние на динамику формирования плазменных образований заключалось в способе обработки поверхности анода. Обычно, при подготовке каждого выстрела поверхность анода протиралась этиловым спиртом, чтобы убрать следы загрязнения, появляющиеся при распылении продуктов взрыва тонкой проволоочки в предшествующих экспериментах. Как правило, в выстрелах с подобной очисткой регистрировался единственный плазменный канал в слу-

Таблица

N	Вещество	d , мкм	l , мм	h_g , мм	U_{max} , кВ	I_{max} , А
160226-3	Mo	25	1.75	1.30	5.9	730
160201-3	Mo	25	1.64	1.25	6.6	620
160204-2	Ti	34	2.20	1.44	6	620
160129-3	Mo	25	2.00	1.48	6.5	600
160328-5	Mo	25	1.08	1.05	5.5	600
160328-6	Mo	25	0.98	1.30	7.8	600

Примечание. N — номер выстрела, d и l — диаметр проволоочки и длина ее проекции на ось разрядного промежутка, h_g — зазор между торцом проволоочки и анодом, U_{max} и I_{max} — максимальные напряжение и ток через разрядный промежуток.

чайном месте анода. В выстрелах без очистки анода, т. е. со следами распыленного в предыдущем выстреле материала проволоочки, до момента образования сплошного плазменного канала, соединяющего электроды, могло наблюдаться несколько плазменных анодных образований.

Были проведены специальные эксперименты, в которых поверхность анода полностью закрывалась диэлектриком. В качестве диэлектрика использовались полиэтилен толщиной около 60 мкм или майларовая пленка толщиной 10 мкм. Если поверхность анода закрывалась тонкой диэлектрической пленкой, скорость формирования анодных сгустков существенно уменьшалась по сравнению с экспериментами, в которых пленка отсутствовала. В том случае, когда использовался толстый пластик, пробой промежутка вообще не развивался, высоковольтный генератор при этом работал в режиме разрядки на несогласованную нагрузку с сопротивлением 125 Ом. После этого эксперимента на поверхности пластика были обнаружены подплавленные отпечатки (масштабом около 500 мкм), характерные для электронных пучков или лавин электронов.

В экспериментах ни разу не было зарегистрировано формирование плазменного анодного сгустка до появления плотной прикатодной плазмы. Данное утверждение справедливо и в том случае, когда целенаправленно создавались локальные области с высокой напряженностью поля на аноде. Для этого на аноде устанавливалась медная проволоочка диаметром 150 мкм, смещаемая на разные расстояния от оси по отношению к проволоочке, установленной на катоде.

Основные параметры выстрелов, представленных в работе, приведены в таблице.

На рис. 1б-г приведена интерферограмма, полученная в I-ом канале регистрации, одного из тех выстрелов, в которых формировалось только одно плазменное образование на аноде после предварительной очистки его поверхности этиловым спиртом. В данном случае приведены оба интерференционных изображения, полученные сдвиговым интерферометром (см. подробнее принцип их формирования в [12]). Сигналы датчиков тока и напряжения за первые 50 нс разряда приведены на рис. 1д.

Острые было изготовлено из молибденовой проволоочки диаметром 25 мкм. Изображения, приведенные на рис. 1б-г, получены на 27-й нс после прихода импульса напряжения на нагрузку; в этот момент ток через промежуток равен $I \approx 30$ А, напряжение — $U \approx 3.8$ кВ. На рис. 1в в области анодного плазменного образования максимальное значение сдвига интерференционной полосы составляет $k \approx 0.4$; поперечный размер этого канала составляет $d_c \approx 40$ мкм. По этим данным можно получить оценку величины его электронной плотности, которая составляет $\bar{N}_e \approx 4 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

В правой части сдвиговой интерферограммы на рис. 1б изображение анодного плазменного канала попало в область тени (3 на рис. 1г) из-за поглощения части левого интерферирующего пучка анодом. Благодаря этому, его изображение на аноде в данной части сдвиговой интерферограммы можно рассматривать как отдельный теневой кадр.

На рис. 2 представлены результаты выстрела № 160201-3 из той серии экспериментов, в которых не выполнялась предварительная очистка латунно-

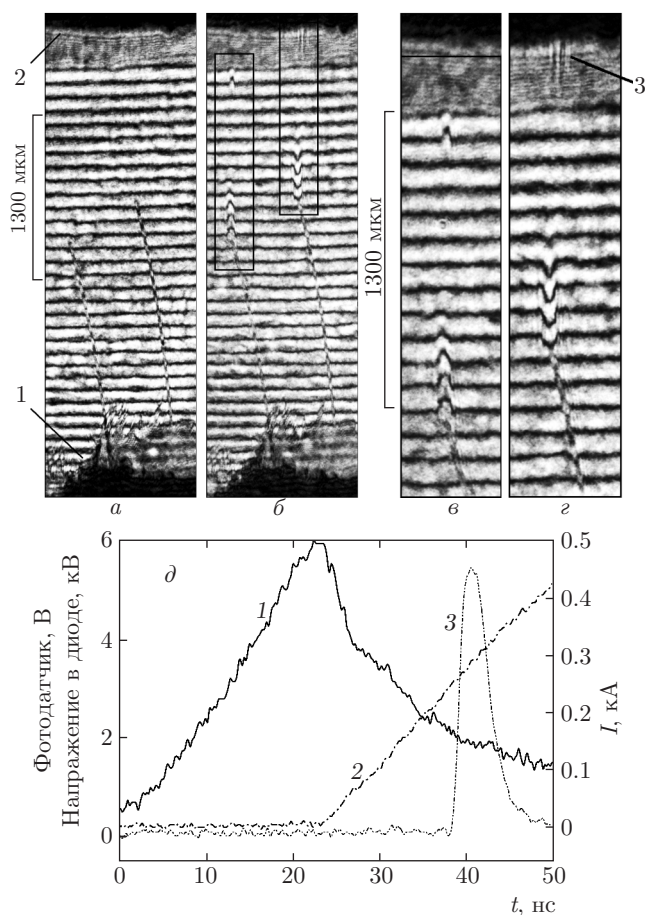


Рис. 1. Изображения разрядного промежутка, полученные в выстреле № 160226-3: *а, б* — интерферограммы, полученные до выстрела (*а*) и через 27 нс после подачи импульса напряжения на промежуток (*б*); *в, г* — увеличенные изображения областей на сдвиговой интерферограмме, помеченных на рис. 1*б* прямоугольниками. Продольный и поперечный масштабы равны между собой. Цифрами обозначены следующие объекты: 1 — катод, 2 — анод, 3 — изображение анодного сгустка в области тени; *д* — сигналы с датчиков в первые 50 нс разряда: кривые 1, 2 — осциллограммы напряжения и тока; кривая 3 — сигнал с фотодатчика, установленного в III-ем оптическом канале

го анода перед каждым выстрелом. Сигналы с датчиков тока и напряжения за первые 60 нс приведены на рис. 2з. Изображения, представленные на рис. 2б,г, получены через 40 нс, а на рис. 2е — через 53 нс от момента подачи импульса напряжения на нагрузку. В эти моменты времени анодный шунт регистрирует ток через промежуток $I \approx 35$ А и 360 А, а напряжение равно соответственно $U \approx 5.6$ кВ и 2.8 кВ.

На шлирен-изображениях, представленных на рис. 2г видны три плазменных канала на поверхно-

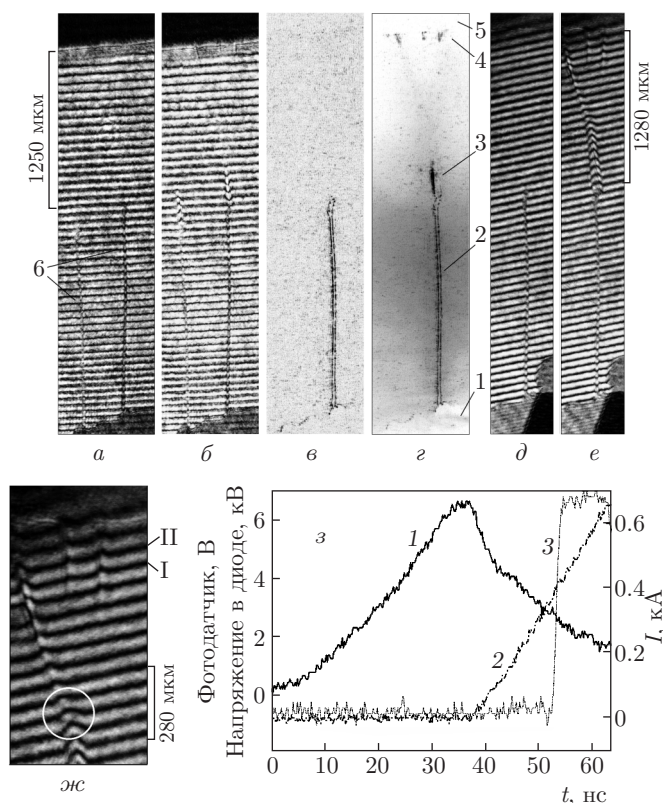


Рис. 2. Изображения разрядного промежутка, полученные в выстреле № 160201-3: *а, б, д, е, ж* — интерферограммы и *в, г* — шлирен-изображения, полученные до выстрела (*а, в, д*), через 40 нс (*б, г*) и 53 нс (*е*) после подачи импульса напряжения на промежуток; *ж* — прианодная часть изображения (*е*) в увеличенном масштабе. Продольный и поперечный масштабы равны между собой. На рисунках цифрами обозначены следующие объекты: 1 — катод, 2 — дифракционное изображение проволочки, 3 — катодный сгусток плазмы, 4 — три анодных сгустка, 5 — анод, 6 — два сдвиговых изображения на интерферограмме; *з* — сигналы с датчиков в первые 60 нс разряда: кривые 1, 2 — осциллограммы соответственно напряжения и тока, кривая 3 — сигнал с фотодатчика, установленного в III-ем оптическом канале

сти анода, находящихся на разных расстояниях друг относительно друга. Приблизительный размер каждого из них в поперечном направлении, измеренный по шлирен-изображению, составляет $d_c \approx 20$ мкм; величина сдвига интерференционной полосы в области среднего и правого на рис. 2б находится на пределе чувствительности метода; поэтому их электронная плотность по порядку величины составляет $N_e \sim 10^{19}$ см⁻³.

Размеры анодных образований в продольном направлении, определенные по шлирен-изображению

(рис. 2*г*), для каждого из них составили $l_c \approx \approx 100$ мкм, 60 мкм и 80 мкм, соответственно для левого, среднего и правого. В зазоре между торцом проволоочки и анодом видны диффузные изображения каналов, соединяющих анодные образования с торцом проволоочки. Эти каналы могут являться интегральным изображением свечения разряда, проходящего через набор светофильтров, или представлять собой шпирен-изображение, полученное при прохождении зондирующего лазерного пучка через плазму с малыми градиентами электронной плотности.

Через 13 нс после этого момента только левый плазменный канал успевает соединиться с катодным (рис. 2*е*); размеры двух других и средние скорости их роста в продольном направлении составляют $l_c \approx 360$ мкм и 500 мкм, и $v_c \approx 20$ км/с и 30 км/с соответственно для среднего и правого. На рис. 2*ж* в увеличенном масштабе представлена прианодная область рис. 2*е*. Длина левого плазменного канала к 53-й нс составляет $l_c \approx 700$ мкм (от поверхности анода до точки слияния с катодным каналом, которая обозначена на рис. 2*ж* кружком); средняя скорость его прорастания — $v_c > 45$ км/с. Поперечный размер левого плазменного канала в области его пересечения интерференционной полосой, обозначенной I на рис. 2*ж*, составляет $d_c \approx 50$ мкм, максимальный сдвиг полосы — $k \approx 0.8$. По этим данным получаем $\bar{N}_e \approx 6 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Поперечные размеры правого и среднего каналов на этом же изображении $d_c \approx 40$ мкм (вдоль полосы I на рис. 2*ж*) и около 30 мкм (вдоль полосы II) соответственно, а величина максимального сдвига рассматриваемой полосы у каждого близка к $k_{min} = 0.1$. Следовательно, величина электронной плотности в обоих каналах составляет $\bar{N}_e \sim 10^{19}$ см⁻³.

Характерные поперечные размеры катодного плазменного канала в области сдвига ближайшей к торцу проволоочки интерференционной полосы (рис. 2*б,е*) на 40-ой и 53-й нс составляют соответственно $d_c \approx 50$ мкм и $d_c \approx 80$ мкм. Средняя скорость его расширения в поперечном направлении, которую можно оценить по этим двум кадрам, составляет $v_c \approx 2.5$ км/с.

Изображения на рис. 3*а-е* (выстрел № 160204-2) получены через 36 нс и 49 нс от момента подачи импульса напряжения на нагрузку (на рис. 3*е* приведено увеличенное изображение области, выделенной прямоугольником на рис. 3*г*). В эти моменты анодный шунт регистрирует токи через разрядный промежуток $I \approx 70$ А и 240 А, а напряжения равны соответственно $U \approx 3.7$ кВ и 2 кВ. На

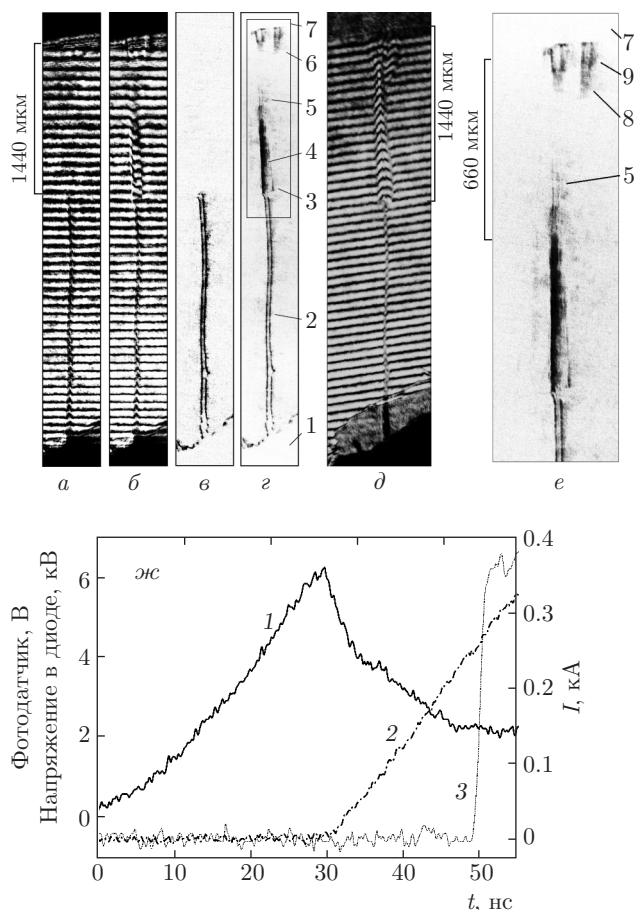


Рис. 3. Изображения разрядного промежутка, полученные в выстреле № 160204-2: *а, б, д* — интерферограммы и *в, г, е* — шпирен-изображения, полученные до выстрела (*а, в*), через 36 нс (*б, г*) и через 49 нс (*д*) после подачи импульса напряжения на промежуток; *е* — часть изображения, обозначенная прямоугольником на *г*, в увеличенном масштабе. Продольный и поперечный масштабы равны между собой. На рисунке цифрами обозначены следующие объекты: 1 — катод; 2 — дифракционное изображение проволоочки; 3 — рефракция в области с показателем преломления $n > 1$; 4 — рефракция в области с показателем преломления $n < 1$; 5 — прорастающий канал; 6 — два анодных сгустка; 7 — анод; *жс* — сигналы с датчиков в первые 50 нс разряда: кривые 1, 2 — осциллограммы соответственно напряжения и тока; кривая 3 — сигнал с фотодатчика, установленного в III-ем оптическом канале

рис. 3*г* видна особенность (обозначена 5), которая не была зарегистрирована в других выстрелах: тонкая плазменная нить, прорастающая из вершины катодного канала в сторону одного из двух плазменных каналов на аноде. Диаметр нити равен $d_c \approx \approx 30$ мкм, т.е. порядка диаметра проволоочки. Поскольку шпирен-изображение этой нити имеет слабую интенсивность, можно предположить, что гра-

диенты показателя преломления в этой области малы.

Симметричные области потемнения на границах канала (5 на рис. 3е) на асимметричном шпирен-изображении могут быть обусловлены плазмой со степенью ионизации около 8% — при такой степени ионизации азота вклады нейтральной и электронной компонент в коэффициент преломления близки (см. [13]); поэтому на шпирен-изображении осесимметричного плазменного объекта тень будет как со стороны $n < 1$, так и $n > 1$. Отсутствие тени внутри канала 5 на шпирен-изображении свидетельствует о том, что там нет сильных градиентов показателя преломления; последнее возможно, например, в том случае, когда канал является поллой трубчатой структурой. Необходимо отметить, что это может быть также изображение двух отдельных каналов с поперечными размерами в единицы микрон, однако для уточнения этого предположения необходимо на порядок улучшить пространственное разрешение регистрирующей оптической системы.

Скорость прорастания анодных каналов, судя по их продольному размеру, практически одинакова на данной стадии разряда — через 36 нс от прихода импульса напряжения. При этом в их структуре можно выделить две характерных области — 8, 9 на рис. 3е: в области 9 границы плазменного объекта видны четко, т. е. они обладают заметным градиентом электронной плотности; можно предположить, что эта область представляет собой уже сформированный плазменный канал. Вершины этих областей с нечеткими границами (8 на рис. 3е) выглядят менее темными, что свидетельствует о более слабых градиентах показателя преломления; возможно, это области, в которых анодные каналы только формируются. На рис. 3д приведено интерференционное изображение разрядного промежутка в том же выстреле, полученное в более поздний момент времени (через 49 нс после прихода импульса напряжения), из которого следует, что левый анодный и катодный плазменные каналы уже объединились в единый токовый канал. Правый анодный канал, еще растущий по дуге к уже сформированному сплошному межэлектродному каналу, создает древовидную картину.

В некоторых выстрелах удавалось зарегистрировать несколько катодных образований, разнесенных друг относительно друга на некоторое расстояние, и аналогичное число плазменных образований на аноде. В приведенных ниже данных на рис. 4 (выстрел № 160129-3) в качестве острейного электрода использовалась проволочка с деформированным тор-

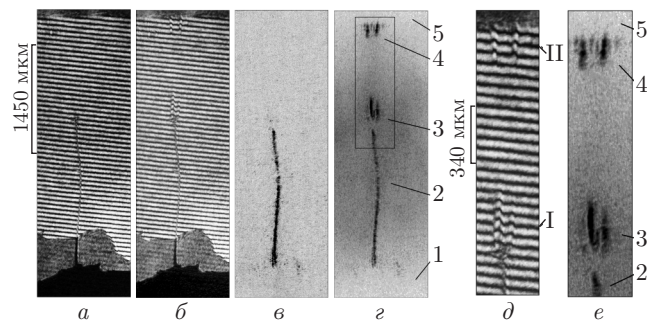


Рис. 4. Изображения разрядного промежутка, полученные в выстреле № 160129-3: а, б — интерферограммы и в, з — шпирен-изображения, полученные до выстрела а, в и через 46 нс после подачи импульса напряжения на промежуток (б, з); д, е — увеличенные интерферограмма и шпирен-изображение области, обозначенной прямоугольником на рис. з. Продольный и поперечный масштабы равны между собой. Цифрами обозначены следующие объекты: 1 — катод, 2 — дифракционное изображение проволочки, 3 — два катодных сгустка, 4 — два анодных сгустка, 5 — анод

цом: при изготовлении острия на конце проволочки образовалась сложная структура диаметром около 90 мкм с неоднородной поверхностью, содержащей множество микроострий. Увеличенная площадь торца и наличие многих неоднородностей на нем привели к тому, что на данных затравках сформировались два катодных сгустка плазмы с очень сильными градиентами показателя преломления.

На рис. 4 приведены изображения, полученные в этом выстреле на 46-ой нс. В этот момент ток через разрядный промежуток равен $I \approx 100$ А, напряжение — $U \approx 3.7$ кВ. Видно, что два катодных канала проросли в продольном направлении, нигде не пересекаясь; примерная их длина и средняя скорость распространения, измеренная по рис. 4з, у левого составляет $l_c \approx 380$ мкм и $v_c \approx 25$ км/с, правого — соответственно 300 мкм и 20 км/с. Оценка электронной плотности, определенная по максимуму сдвига интерференционной полосы I ($k \approx 0.4$, $d_c \approx 50$ мкм) на рис. 4д, для левого канала составляет $\bar{N}_e \approx 6 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

Особенностью этого выстрела является формирование не только двух катодных плазменных каналов, но и последующее формирование двух каналов на аноде (4 на рис. 4з, е), разнесенных друг относительно друга на 90 мкм. Длина левого канала составляет 200 мкм, правого — 170 мкм (см. рис. 4е). На рис. 4д видно, что анодные образования, так же как и катодные, не пересекаются. Оценка электронной плотности, определенной по максимуму сдвига интерференционной полосы II ($k \approx 0.2$, $d_c \approx 50$ мкм)

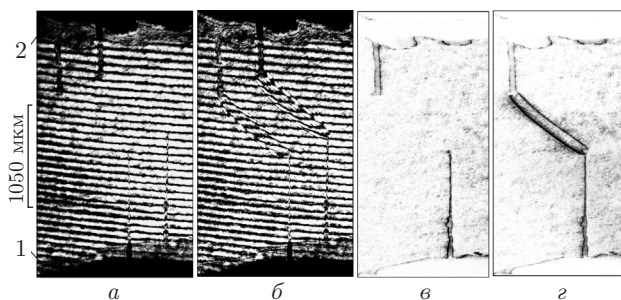


Рис. 5. Изображения разрядного промежутка, полученные в выстреле № 160328-5: *a, б* — интерферограммы; *в, г* — шлирен-изображения, полученные до выстрела (*a, в*) и через 34 нс после подачи импульса напряжения на промежуток (*б, г*). Цифрами обозначены следующие объекты: 1 — катод, 2 — анод

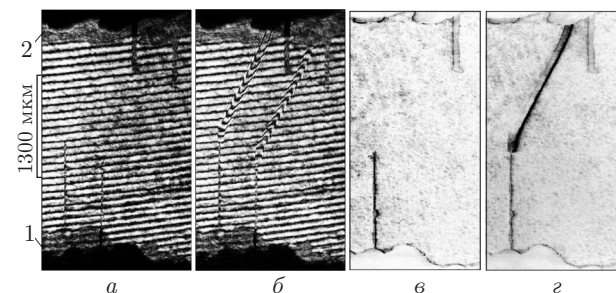


Рис. 6. Изображения разрядного промежутка, полученные в выстреле № 160328-6: *a, б* — интерферограммы; *в, г* — шлирен-изображения, полученные до выстрела (*a, в*) и через 32 нс после подачи импульса напряжения на промежуток (*б, г*). Цифрами обозначены следующие объекты: 1 — катод, 2 — анод

на рис. 4*d*, для обоих анодных каналов по порядку величины составляет $\bar{N}_e \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Необычно выглядят результаты приведенных ниже экспериментов в несоосной геометрии «острие–острие» (см. рис. 5, 6). На поверхности плоского анода располагалось одиночное острие из медной проволоочки диаметром 150 мкм; катодное и анодное острия были разнесены друг относительно друга на расстояние $h_{ac} \leq 1 \text{ мм}$ и располагались в одной плоскости, перпендикулярной зондирующему лучу лазера.

Изображения на рис. 5*б, г* получены в выстреле № 160328-5 через 34 нс после подачи импульса напряжения; видно, что плазменный канал возникает между торцами проволоочек. С подобным расположением острий такое развитие канала происходило во всех выстрелах. На рис. 6*б, г* приведены изображения, полученные в выстреле № 160328-6, в котором канал формировался по направлению к анодному острию, но проходил мимо него.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов расчета распределения поля в промежутке с геометрией электродов «игла–плоскость» с помощью кода КАРАТ [14] следует, что при напряжении 10 кВ и диаметре катодной проволоочки от 50 мкм и меньше максимальная напряженность продольного электрического поля в приближении полусферического скругления торца проволоочки превышает 10^6 В/см ; причем величина радиальной напряженности поля на боковой поверхности проволоочки на расстоянии в один–два диаметра от ее торца не очень сильно отличается от этого значения. Поэтому наличие различных микро неоднородностей на поверхности катодного острия или диэлектрических вкраплений может приводить к взрывной эмиссии с формированием микросгустков плазмы (масштаба единиц микрон) в локальных точках усиления электрического поля на торце проволоочки. В результате численного и теоретического анализов [15] показано, что в вакууме плазма металла, сформированная вследствие взрывной эмиссии в малом объеме вблизи поверхности электрода (на расстояниях микронного масштаба), может обладать большой электронной плотностью, порядка 10^{19} см^{-3} . Ввиду существенно больших размеров наблюдаемых в нашем случае плазменных каналов на катоде, привлечь для объяснения их формирования только механизм взрывной эмиссии недостаточно.

Высокие электронные плотности в прорастающих плазменных каналах (как с катода, так и с анода) можно объяснить, если предположить, что в них высока степень диссоциации молекул (около 100 %); в этом случае достаточно будет однократной ионизации атомов, чтобы получить электронную плотность $\bar{N}_e \sim 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При наличии же многозарядных ионов, например, двукратно ионизованных атомов азота и кислорода, величина электронной плотности может быть еще больше. Поскольку поле на аноде существенно ниже (на 2–3 порядка), чем у торца катодной проволоочки, а возникновение там взрывной ионной эмиссии исключено, косвенным указанием на важность ионизационных процессов в формировании сгустков плазмы является тот факт, что параметры каналов катодной плазмы не сильно отличаются от параметров плазмы на аноде.

Для подтверждения предположения о наличии многозарядных ионов в плазменных каналах необходимо провести спектроскопические исследования. Отметим, что в ряде работ при исследовании наносекундных разрядов, как в воздухе, так и в различ-

ных газовых смесях, также были зарегистрированы высокие значения электронных плотностей, например, на оси филаментов $\bar{N}_e \sim 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ [16–18].

Механизм возникновения анодных образований исследован менее подробно. Особенно это касается формирования начальной затравки на поверхности. Согласно [19], их распространение можно описать как рост катодонаправленных стримеров, который связан с уходом плазменных электронов на анод из объема уже существующей плазмы. При этом вблизи границы плазменного образования, обращенной к катоду, из-за ухода электронов резко усиливается поле за счет пространственного заряда оставшихся малоподвижных ионов. Это поле «втягивает» в объем плазмы электроны из окружающей среды, которые, в свою очередь, ионизируют газ на пути до анода, если их энергии достаточно для этого процесса. Так, диффузная структура 8 на рис. 3 может представлять собой область с высокой ионизацией воздуха, в которую свободные электроны втягиваются сильным электрическим полем, локализованным на вершине анодного образования.

Присутствие диффузных плазменных образований на поверхности анода на ранней стадии может быть связано как с особенностями эмиссии электронов с катода (например, воздействие на анод пучка убегающих электронов), так и с пробоем диэлектрических пленок различной природы, имеющих на аноде, вследствие накопления на их поверхности отрицательного заряда [20]. В тройных точках металл–диэлектрик–воздух, которыми являются, например, любые повреждения оксидных пленок (трещины, вспучивания, отслаивания и т. д., см. подробнее [21]), облегчено формирование плазменных образований. Судя по времени восстановления пробойных характеристик в экспериментах с толстым катодным острием, оксидные пленки на поверхности электродов играют важную роль в формировании плотной проводящей плазмы и соответственно последующего пробоя разрядного промежутка. В сплошном диэлектрике, в котором отсутствуют металлические включения, контактирующие с анодом, более редкая плазма может формироваться в основном за счет поверхностного пробоя, хотя накопление заряда в локальных областях на поверхности сплошного диэлектрика может создавать условия для быстрого развития сквозного пробоя диэлектрика [22]. Вероятность того или иного варианта зависит от многих факторов (толщина диэлектрика, энергия электронов, попадающих на диэлектрик, шероховатость поверхности и др.).

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 14-22-00273).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Перминов, А. А. Тренькин, ЖТФ **75**, 9 (2005).
2. А. Г. Репьев, П. Б. Репин, В. С. Покровский, ЖТФ **77**, 1 (2007).
3. Ю. Д. Королёв, Г. А. Месяц, *Физика импульсного пробоя газов*, Наука, Москва (1991).
4. Ю. Д. Королёв, В. А. Кузьмин, Г. А. Месяц, В. П. Ротштейн, ЖТФ **49**, 2 (1979).
5. Ю. Д. Королёв, В. А. Кузьмин, Г. А. Месяц, ЖТФ **50**, 4 (1980).
6. А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, *Лазерные методы исследования плазмы*, Наука, Ленинград (1977).
7. Е. В. Паркевич, С. И. Ткаченко, А. В. Агафонов, А. Р. Мингалеев, В. М. Романова, Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз, ЖЭТФ **151**, 627 (2017).
8. Е. В. Паркевич, ПТЭ **3**, 81 (2017).
9. С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский, *Введение в статистическую радиофизику*, ч. 2, Наука, Москва (1978).
10. А. И. Хирьянова, С. И. Ткаченко, в сб.: *Труды 60-й научной конференции МФТИ с международным участием*, 20–25 ноября 2017, Долгопрудный (2017).
11. В. Р. Кухта, В. В. Лопаткин, П. Г. Петров, Опт. и спектр. **56**, 1 (1984).
12. S. A. Pikuz, V. M. Romanova, N. V. Baryshnikov, Min Hu, B. R. Kusse, D. B. Sinars, T. A. Shelkovenko, and D. A. Hammer, Rev. Sci. Instr. **72**, 1098 (2001).
13. С. И. Ткаченко, А. Р. Мингалеев, С. А. Пикуз, В. М. Романова, Т. А. Хаттатов, Т. А. Шелковенко, О. Г. Ольховская, В. А. Гасилов, Ю. Г. Калинин, Физика плазмы **38**, 3 (2012).
14. V. P. Tarakanov, User's Manual for Code KARAT, Springfield, VA: Berclay Research Associates, Inc. (1992).
15. Д. И. Проскуровский, *Эмиссионная электроника*, учеб. пособие для вузов, Изд-во ТГУ, Томск (2010).

16. R. M. van der Horst, T. Verreycken, E. M. van Veldhuizen, and P. J. Bruggeman, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 34 (2012).
17. S. A. Shcherbanev, A. Yu. Khomenko, S. A. Stepanyan, N. A. Popov, and S. M. Starikovskaia, *Plasma Sources Science and Technology* **26**, 2 (2016).
18. A. Lo, A. Cessou, C. Lacour, B. Lecordier, P. Boubert, D. A. Xu, C. O. Laux, and P. Vervisch, *Plasma Sources Science and Technology* **26**, 4 (2017).
19. Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда*, Наука, Москва (1992).
20. Ю. Д. Королёв, Г. А. Месяц, А. П. Хузеев, *ДАН СССР* **253**, 3 (1980).
21. *Физическое материаловедение*, Учебник для вузов в 6 т., под общ. ред. Б. А. Калина, Изд-во МИФИ, Москва (2007).
22. Г. А. Воробьев, Ю. П. Похолков, Ю. Д. Королев, В. И. Меркулов, *Физика диэлектриков (область сильных полей)*, Изд-во ТПУ, Томск (2003).